

# Méthode de mesure de l'efficacité de rayonnement en chambre réverbérante basée sur l'estimation du facteur de qualité composite

J. Sol<sup>1</sup>, P. Besnier<sup>1</sup>, A. Presse<sup>2</sup>, C. Lemoine<sup>1</sup>, A.-C. Tarot<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IETR, INSA, 20 Av. des Buttes de Coësmes, 35708 Rennes, jerome.sol@insa-rennes.fr

<sup>2</sup>IETR, Université de Rennes 1, 263 Av. du Général Leclerc, 35042 Rennes, anthony.presse@univ-rennes1.fr

**Abstract.** Nous proposons dans cet article une méthode de mesure de l'efficacité de rayonnement d'une antenne en chambre réverbérante. Cette méthode peut être considérée comme une variante des méthodes existantes. Elle présente l'intérêt de reposer sur une mesure simultanée de l'antenne sous test et de l'antenne de mesure dont l'efficacité de rayonnement est supposée être connue. Les résultats obtenus sont comparés avec une méthode classique de substitution de l'antenne de référence par l'antenne sous test. Outre la simplification de la procédure d'essai, l'estimation obtenue présente des fluctuations de plus faible amplitude.

## I. Introduction

La mesure d'efficacité de rayonnement en chambre réverbérante a fait l'objet de nombreuses contributions depuis une quinzaine d'années à l'aide de différentes méthodes. La méthode proposée à l'origine [1] [2] [3] est basée sur l'évaluation de la puissance totale rayonnée par une antenne sous test lorsqu'on la substitue à une antenne de référence d'efficacité connue. Cette méthode a notamment été confrontée aux techniques de type « wheeler cap » [4] confirmant ainsi leur intérêt. Plus récemment, une méthode basée sur l'estimation du coefficient de qualité de la chambre réverbérante en régime transitoire a également montré qu'il était possible d'accéder directement à cette valeur en réalisant une mesure de transmission entre l'antenne sous test et l'antenne de référence [5]. La méthode alternative proposée dans cet article est en réalité assez proche de cette dernière mais repose sur la similitude des coefficients de qualité composite, mesurés dans le domaine harmonique par l'une et l'autre antenne, placées toutes deux dans la chambre réverbérante. Cette évaluation est effectuée simultanément au moyen d'un analyseur de réseau vectoriel à deux ports et repose sur l'estimation du coefficient de qualité à partir des seuls coefficients de réflexion complexes mesurés aux bornes d'une antenne pour différents états de la chambre [6]. La section II de cet article est consacrée à l'exposé théorique de cette méthode après avoir rappelé le principe de la méthode de substitution également utilisée pour les confrontations expérimentales. La section III décrit le protocole de mesure. Deux antennes sont ensuite

mesurées en section IV. La première est une antenne de laboratoire, une antenne cornet dont l'efficacité est a priori connue (90 %) [5]. La seconde est une antenne intégrée à un textile fonctionnant à 401 MHz pour des applications ARGOS. Nous concluons ensuite sur la performance de cette méthode.

## II. Théorie

### II.1. Méthode classique de substitution

La méthode de substitution [1] [2] [3] peut être transcrite dans le contexte de la mesure de paramètres S via un analyseur de réseau vectoriel. Le port 1 de l'analyseur de réseau est connecté à une antenne de mesure tandis que le port 2 est connecté à une antenne d'efficacité connue  $\eta_1$  puis à l'antenne sous test. Le calcul de l'efficacité de rayonnement de l'antenne à mesurer notée  $\eta_2$ , s'écrit :

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{\langle |S_{21_{mes}}|^2 \rangle (1 - |\langle S_{11_{ref}} \rangle|^2) (1 - |\langle S_{22_{ref}} \rangle|^2)}{\langle |S_{21_{ref}}|^2 \rangle (1 - |\langle S_{11_{mes}} \rangle|^2) (1 - |\langle S_{22_{mes}} \rangle|^2)} \quad (1)$$

Où  $\eta_1$  correspond à l'efficacité de rayonnement connue, l'indice "ref" correspond à la mesure des paramètres S lors de la phase de référence, l'indice "mes" correspond à la mesure de l'antenne sous test lors de la phase de mesure. Le terme  $\langle \rangle$  correspond à la moyenne d'ensemble des différents états de la chambre durant les brassages mécanique et fréquentiel.

### II.2. Méthode alternative du facteur de qualité en régime harmonique

Deux antennes sont installées dans la chambre réverbérante et connectées aux deux ports de l'analyseur de réseau vectoriel. Nous utilisons chacune de ces deux antennes séparément pour estimer le facteur de qualité composite à partir des mesures de  $S_{11}$  ou  $S_{22}$ . Nous nous référons à l'une quelconque de ces antennes à l'aide de la lettre "x", i.e.  $x = 1$  ou  $x = 2$ . La puissance transmise par une antenne est écrite :

$$P_t = (1 - |\langle S_{xx} \rangle|^2) \eta_x P_{inj} \quad (2)$$

Dans cette équation,  $P_{inj}$  représente la puissance de sortie de l'analyseur de réseau supposée constante pour toutes les mesures effectuées.  $S_{xx}$  représente l'énergie

réfléchi (dû à la désadaptation de l'antenne) du port d'entrée de l'antenne  $x$  dont l'efficacité de rayonnement est  $\eta_x$ . Le paramètre complexe  $S_{xx}$  doit prendre en compte l'addition de deux contributions (le coefficient de réflexion en espace libre et la rétroaction de la chambre). La première contribution  $\langle S_{xx} \rangle$  est estimée à partir de la moyenne d'ensemble des réalisations (positions de brasseur) des valeurs complexes  $S_{xx}$  et la seconde est proportionnelle à la fonction de transfert de la chambre notée  $H$ . Cette fonction de transfert est ici définie entre l'antenne et elle-même, au sens où une antenne d'émission en chambre réverbérante constitue également une antenne de réception sensible au rayonnement, qu'elle aura elle-même généré. Le paramètre  $S_{xx}$  s'écrit alors :

$$S_{xx} = \langle S_{xx} \rangle + (1 - |\langle S_{xx} \rangle|^2) H \eta_x \quad (3)$$

En réarrangeant et en prenant le module au carré de cette expression, nous avons :

$$|S_{xx} - \langle S_{xx} \rangle|^2 = (1 - |\langle S_{xx} \rangle|^2)^2 |H|^2 \eta_x^2 \quad (4)$$

Ensuite, en prenant la moyenne d'ensemble (des positions de brasseur) de cette équation, nous obtenons :

$$\langle |S_{xx} - \langle S_{xx} \rangle|^2 \rangle = (1 - |\langle S_{xx} \rangle|^2)^2 \langle |H|^2 \rangle \eta_x^2 \quad (5)$$

$|H|^2$  est homogène à la puissance reçue  $P_{recI}$  à l'entrée de l'antenne compte tenu de la puissance transmise  $P_t$  dans la chambre :

$$|H|^2 = \frac{P_{recI}}{P_t} \quad (6)$$

Sur tous les états de la chambre, nous pouvons écrire :

$$\langle |H|^2 \rangle = \frac{\langle P_{recI} \rangle}{P_t} \quad (7)$$

La puissance moyenne reçue  $\langle P_{recI} \rangle$  est de la forme :

$$\langle P_{recI} \rangle = \frac{\lambda^2 E^2}{4\pi Z_0} \quad (8)$$

L'antenne d'émission-réception possède en effet une aire effective de  $\lambda^2/4\pi$  [7]. Nous établissons le facteur de qualité composite pour une antenne avec l'expression suivante :

$$Q_x = \langle |S_{xx} - \langle S_{xx} \rangle|^2 \rangle \frac{Z_0 \omega \epsilon V}{(\lambda^2/4\pi)(1 - |\langle S_{xx} \rangle|^2)^2 \eta_x^2} \quad (9)$$

Le facteur de qualité composite  $Q_x$  peut également s'écrire sous la forme :

$$Q_x = \frac{Q'_x}{\eta_x^2} \quad (10)$$

$Q'_x$  est le facteur de qualité composite de la chambre modifié par l'antenne de mesure compte tenu de son efficacité de rayonnement intrinsèque  $\eta_x$ . Le facteur de qualité composite  $Q_x$  évalué via l'une ou l'autre des

deux antennes peut être considéré comme similaire si la fréquence est suffisamment élevée (typiquement 300 MHz dans la grande chambre réverbérante de l'IETR de 2,9 m x 3,7 m x 8,7 m) [6].

$$Q_1 = Q_2 \quad (11)$$

La valeur du facteur de qualité composite peut être déterminée si l'efficacité  $\eta_1$  de l'antenne de référence est connue. L'efficacité  $\eta_2$  de l'antenne sous test, est alors déterminée à partir de l'équation suivante :

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{Q'_2}{Q_1}} \quad (12)$$

L'efficacité totale peut être ensuite estimée selon :

$$\eta_{2,tot} = \eta_2 (1 - |\langle S_{22} \rangle|^2) \quad (13)$$

Le coefficient de réflexion de l'antenne sous test en espace libre peut être également restitué sous la forme :

$$S_{22}[dB] = 10 \log_{10}(|\langle S_{22} \rangle|^2) \quad (14)$$

### III. Protocole de mesure

#### III.1. Configuration

Des expériences ont été réalisées dans la chambre réverbérante de l'IETR dont les dimensions sont de 2,9 m x 3,7 m x 8,7 m. La fréquence de son mode fondamental est de 43 MHz. Lors de l'application de la méthode classique de substitution, la première phase consiste à placer l'antenne de référence qui est ici une antenne log-périodique de marque Ets-Lindgren et de modèle 3148 dont la bande passante est de [200 – 2 000] MHz, et une autre antenne identique. La deuxième phase consiste à remplacer l'une des antennes log-périodiques par l'antenne à mesurer. L'application de la méthode du facteur de qualité en régime harmonique revient à utiliser uniquement cette deuxième configuration de mesure de la méthode de substitution. La configuration de mesure de la méthode du facteur de qualité se trouve en Fig. 1 avec une antenne sous test qui est ici une antenne cornet. Les deux antennes sont reliées aux deux ports de l'analyseur de réseau vectoriel. Un balayage fréquentiel [200 – 2 000] MHz avec 9 001 points de fréquence est réalisé pour 100 positions de brasseur.

#### III.2. Post-traitement

L'efficacité de rayonnement de l'antenne log-périodique est considérée égale à 0,9 [5]. L'estimation de l'efficacité de rayonnement est effectuée tous les 3 MHz sur la base d'un échantillon constitué de 1 500 réalisations (15 fréquences et 100 positions de brasseurs). Le facteur de qualité composite  $Q_1$  est évalué selon l'équation (9) à partir des mesures de  $S_{11}$  et avec  $\eta_1 = 0,9$ . Précisons que

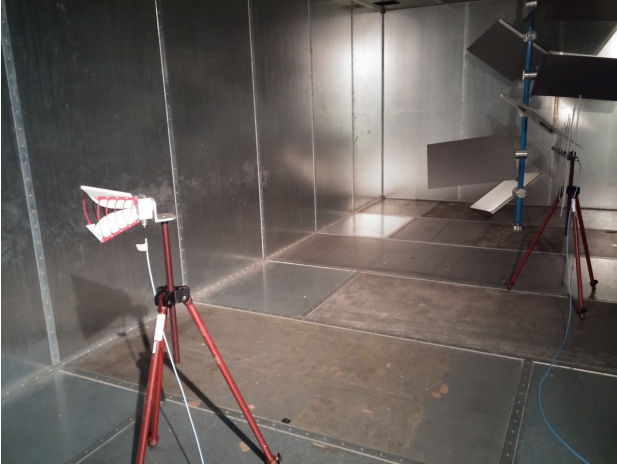


Fig. 1. Configuration de mesure de l'antenne cornet.

l'évaluation de  $Q_x$  selon l'équation (9), est réalisée pour chacune des 15 fréquences, la moyenne d'ensemble étant calculée sur les 100 positions de brasseur. Les valeurs de  $Q_x$  exploitées constituent donc la moyenne des 15 estimations sur l'intervalle de 3 MHz. Le coefficient  $Q'_2$  est ensuite calculé à partir des mesures de  $S_{22}$  selon l'équation (10). Puis,  $\eta_2$  est calculée selon l'équation (12).

#### IV. Résultats

##### IV.1. Mesure de l'efficacité de rayonnement d'une antenne large bande

Une antenne cornet (Ets-Lindgren modèle 3115A) possède une bande passante de  $[750 - 18\,000]$  MHz. Son efficacité de rayonnement est cependant mesurée sur la bande  $[200 - 2\,000]$  MHz de l'antenne log-périodique. Les résultats de mesure selon la méthode de substitution apparaissent à la Fig. 2. A titre indicatif, le coefficient de réflexion de l'antenne cornet est reporté sur ce graphe. Il fait bien apparaître que l'antenne cornet est hors bande de fonctionnement en deçà de 800 MHz environ. Corrélativement, l'efficacité de rayonnement atteint à partir de cette même fréquence un plateau dont la valeur moyenne est estimée à 91 %. Il convient cependant de remarquer que cette estimation possède d'importantes fluctuations. Les courbes de la Fig. 3 permettent de comparer ce résultat à celui de l'efficacité de rayonnement évalué par la méthode du coefficient de qualité. La moyenne de l'estimation au-delà de 800 MHz est quasi-identique (92 %) tandis que les fluctuations sont cette fois bien plus limitées. En particulier, les artefacts d'estimation supérieurs à 100 % sont supprimés. Ceci est la conséquence d'une procédure simplifiée qui ne requiert qu'un jeu de réalisations de paramètres  $S_{11}$  et  $S_{22}$ .

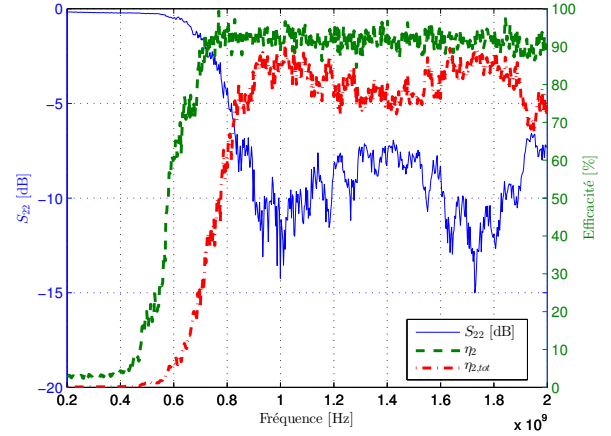


Fig. 2. Résultats de mesures de l'antenne cornet.

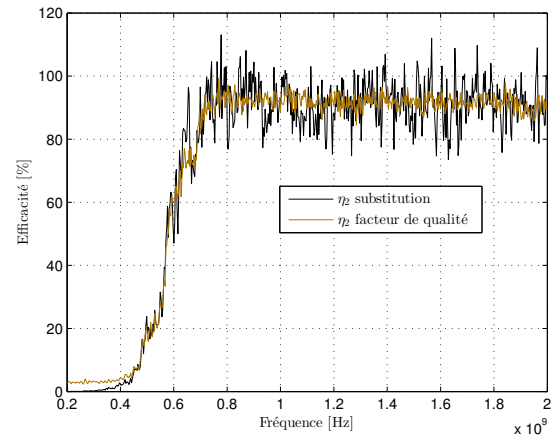


Fig. 3. Comparaison entre mesures de l'efficacité de rayonnement de l'antenne cornet.

##### IV.2. Mesure de l'efficacité de rayonnement d'une antenne bande étroite

L'antenne bande étroite est une antenne PIFA planaire souple. Elle est conçue pour résonner à la fréquence de résonance centrée sur 401 MHz pour des applications ARGOS. Le substrat souple utilisé est un caoutchouc silicone dont la permittivité mesurée est de 3 et la tangente de pertes de 0,04. Les parties conductrices sont en électro-textile, l'alimentation est faite par un cordon coaxial (voir Fig. 4). Les résultats de mesures sont tracés pour la méthode de substitution à la Fig. 5. L'allure du paramètre  $S_{22}$  confirme bien le caractère résonant de l'antenne autour de la fréquence de 400 MHz. L'efficacité de rayonnement de l'antenne mesurée par la méthode du coefficient de qualité croît progressivement jusqu'à atteindre environ 70 % à 400 MHz puis fluctue et diminue progressivement pour atteindre 40 % à 600 MHz. Les courbes d'efficacité de rayonnement mesurée selon les deux méthodes sont juxtaposées à la Fig. 6. Les tendances sont identiques, cependant, on constate une

nouvelle fois que les fluctuations associées à la méthode du coefficient de qualité sont de bien moins grande amplitude. Pour compléter les résultats, l'efficacité de l'antenne est simulée avec un code de calcul résolvant les équations de Maxwell. Nous avons choisi un code de calcul dans le domaine temporel basé sur la technique d'intégration finie. Ceci permet de générer la réponse sur une large bande de fréquence avec une simulation unique sous le logiciel CST Microwave Studio. La tendance générale de la courbe simulée est proche des estimations expérimentales. Cependant, la fluctuation de l'efficacité de rayonnement apparente selon la courbe simulée entre 400 MHz et 600 MHz n'est pas reproduite en mesure. Une investigation plus approfondie est ici nécessaire pour identifier l'origine de cette différence.

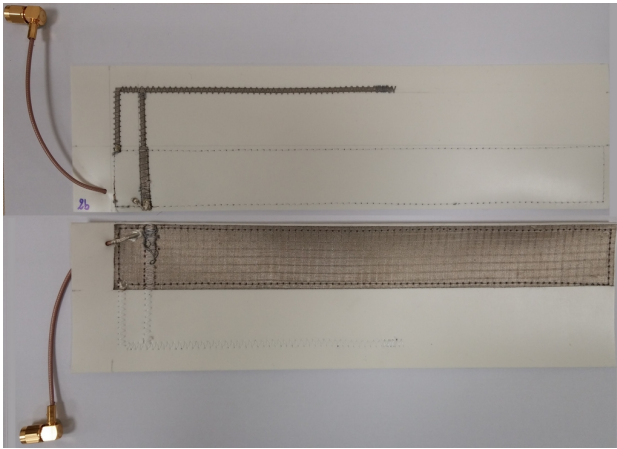


Fig. 4. Photo de l'antenne bande étroite.

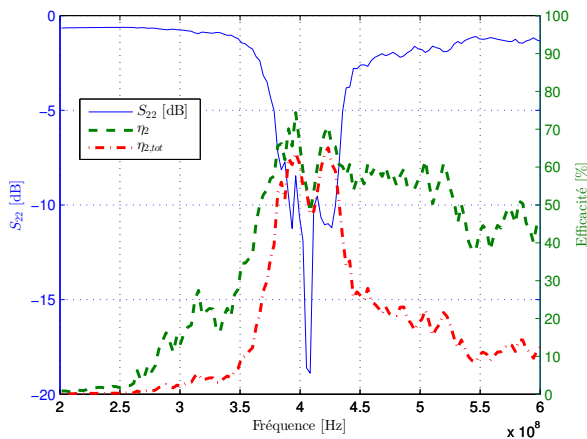


Fig. 5. Résultats de mesures de l'antenne bande étroite.

## V. Discussion à propos des fluctuations

Les fluctuations enregistrées au moyen de la méthode du facteur de qualité sont liées à l'estimation du rapport de deux estimations du facteur de qualité. Chacune de ces

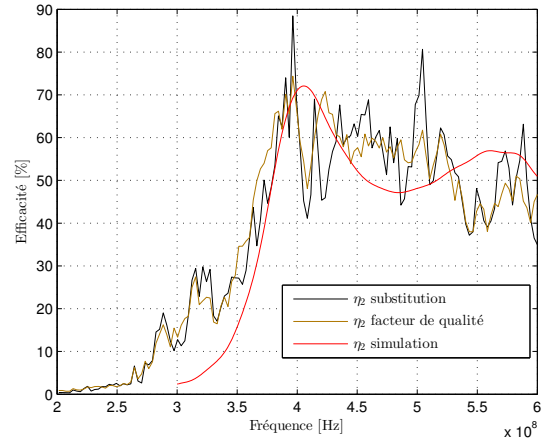


Fig. 6. Comparaison entre mesures de l'efficacité de rayonnement de l'antenne bande étroite.

deux estimations repose essentiellement sur l'estimation de l'écart-type des fluctuations de  $S_{xx}$ . Dans le cadre de la méthode de substitution, l'estimation de l'efficacité de rayonnement repose également sur un rapport, celui du carré des coefficients de transmission  $S_{21}$  entre les deux paires d'antennes successives. On pourrait donc s'attendre à un niveau de fluctuation similaire. Cependant, dans le cas de la méthode de substitution, la conservation du coefficient de qualité est implicite (Eq. (1)). Au contraire, ceci est explicite (Eq. (11)) pour la méthode du coefficient de qualité. Ceci tend selon nous à réduire l'incertitude si cette hypothèse est validée. Elle nous semble également renforcée compte tenu de l'utilisation de la chambre dans une seule configuration (mesure unique et simultanée en présence de l'antenne de référence).

## VI. Conclusion

Dans cet article, nous avons introduit une méthode alternative de mesure de l'efficacité de rayonnement basée sur l'estimation du facteur de qualité composite de la chambre réverbérante à partir du coefficient de réflexion d'une antenne. Cette méthode permet la mesure de l'efficacité de rayonnement d'une antenne sous test en une seule phase contrairement à la méthode classique de substitution. Outre, l'avantage d'une configuration de mesure simple pour laquelle l'antenne de référence et l'antenne de test sont connectées à un port d'analyseur de réseau, on vérifie expérimentalement que les fluctuations associées à cette estimation sont réduites par rapport à la méthode classique de substitution.

## REFERENCES

- [1] K. Rosengren, P.-S. Kildal, C. Carlsson, and J. Carlsson, "Characterization of antennas for mobile and wireless terminals in reverberation chambers: improved accuracy by platform stirring", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 30, pp. 391-397, Sept. 2001.
- [2] P.-S. Kildal, C. Carlsson, and J. Yang, "Measurement of free-space impedances of small antennas in reverberation chambers", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 32, pp. 112-115, Jan. 2002.
- [3] K. Rosengren and P.-S. Kildal, "Radiation efficiency, correlation, diversity gain and capacity of a six-monopole antenna array for a MIMO system: theory, simulation and measurement in reverberation chamber", *IEE Proc. Microwave Antennas Propagation*, vol. 152, pp. 7-16, Feb. 2005.
- [4] G. Le Fur, C. Lemoine, P. Besnier, A. Sharaiha, "Performances of UWB Wheeler Cap and Reverberation Chamber to Carry Out Efficiency Measurements of Narrowband Antennas", *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, vol. 8, pp. 332-335, 2009.
- [5] H.G Krauthauser and M. Herbrig, "Yet another antenna efficiency measurement method in reverberation chambers", *Electromagnetic Compatibility (EMC), 2010 IEEE International Symposium on*, pp. 536-540, 25-30 July 2010.
- [6] P. Besnier, C. Lemoine, J. Sol, "Various Estimations of Composite Q-factor with Antennas in a Reverberation Chamber", *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe) 2015*, pp. 1223-1227, 16-22 Aug. 2015.
- [7] I. Junqua, P. Degauque, M. Liénard, and F. Issac, "On the Power Dissipated by an Antenna in Transmit Mode or in Receive Mode in a Reverberation Chamber", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 54, no. 1, pp 174-180, 2012.